

О.В. ВОВНА, к-т. техн. наук, доц. ДВНЗ «ДонНТУ»,
А.А. ЗОРИ, д-р. техн. наук, проф. ДВНЗ «ДонНТУ»,
М.Г. ХЛАМОВ, к-т. техн. наук, проф. ДВНЗ «ДонНТУ»

СПОСІБ КОМПЕНСАЦІЇ ДИНАМІЧНОЇ ПОХИБКИ ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИМІРЮВАЧА КОНЦЕНТРАЦІЇ МЕТАНУ ДЛЯ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ

Розроблений спосіб компенсації динамічної похибки інфрачервоного вимірювача концентрації метану для вугільних шахт. Використання даного способу у стаціонарних вимірювачах концентрації метану дозволяє збільшити вірогідність виявлення та контролю вибухонебезпечних концентрацій при раптових викидах метану у вугільних шахтах.

The method of compensation of dynamic error of infra-red methane concentration measuring device for coal mines is developed. Usage of this method in the stationary methane concentration measuring devices allows increasing of probability of detection and control of highly explosive concentrations at the sudden methane ejection in coal mines.

Вступ. Останніми роками у вугільній промисловості України спостерігається стійка тенденція – збільшення глибини розробки вугілля, зростання частоти та інтенсивності газодинамічних проявів, раптові викиди метану, що призводить до підвищення вірогідності виникнення вибухонебезпечної ситуації та погіршення умов праці гірників [1]. Значною мірою цю проблему можна вирішити із використанням новітніх систем контролю концентрації метану у гірничих виробленнях вугільних шахт, які засновані на сучасній інформаційно-вимірювальній техніці. Розробки авторів відповідають напряму Програми науково-технічного розвитку Донецької області до 2020 р., дослідження проводилися у рамках «Програми наукових досліджень та розробок Міністерства освіти і науки України із пріоритетних напрямків розвитку науки і техніки». Метою роботи є підвищення швидкодії вимірювача концентрації метану при необхідній точності на основі оптико-абсорбційного методу із квазівідкритим оптичним каналом, при обліку та компенсації впливу дестабілізуючих факторів рудничної атмосфери.

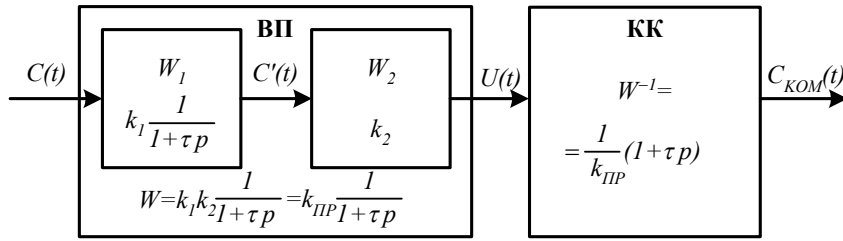
Постановка задачі. При роботі вимірювача концентрації метану в умовах запиленості рудничної атмосфери вугільних шахт та за наявності інших домішок, збільшується похибка вимірювання концентрації метану. Для отримання необхідних показників точності вимірювача аналізовану газову суміш прокачують через фільтри очищення, що призводить до погіршення динамічних властивостей вимірювача. В якості фільтру очищення використовується металева сітка, усередині якої знаходиться вимірювальний оптичний канал. При товщині металевого дроту 0,1 мм та площі отворів фільтру 0,01 мм² постійна часу фільтру складає порядку 1 с, при цьому необхідна швидкодія вимірювача концентрації метану повинна бути не більш

0,8 с [1]. Вимірювання концентрації метану здійснюється не у реальному масштабі часу, а із затримкою пропорційної постійної часу фільтру та технологічних операцій.

Для зниження динамічної похибки вимірювача концентрації метану необхідно зменшити постійну часу фільтру, що призводить до запилення оптичної системи, зниження її надійності та довготривалої стабільності. При цьому, використання різних фільтрів призводить до появи статичної мультиплікативної похибки вимірювання концентрації метану. За основу у запропонованому способі узятá задача удосконалення способу вимірювання концентрації метану [2] в умовах вугільних шахт, в якому за рахунок використання фільтрів очищення досягаються необхідні статичні показники точності вимірювання концентрації газу, а для компенсації динамічної похибки використовуються програмні методи цифрової обробки результатів вимірювань. Цей спосіб забезпечує швидкодію вимірювача при необхідній точності контролю концентрації аналізованого газу, що призводить до збільшення вірогідності виявлення та контролю вибухонебезпечних концентрацій при раптових викидах метану.

Основна частина. Динамічна похибка вимірювань залежить від постійної часу вимірювального перетворювача концентрації метану, а також швидкості його зміни, і може бути скоректована із використанням апаратних та програмних методів. Використання апаратних методів пов'язано з цілим рядом труднощів. При зниженні динамічної похибки шляхом зменшення постійної часу вимірювача концентрації метану, як правило, знижується його надійність та довготривала стабільність. Крім того, використання різних фільтрів призводить до появи статичної мультиплікативної похибки вимірювань. Тому запропоновано виконувати компенсацію динамічної похибки з використанням програмних методів.

Компенсація динамічної похибки є зворотною задачею по відновленню вхідного сигналу за відомою інформацією про апаратну функцію (W) вимірювального перетворювача [3]. Розглянемо задачу зміни миттєвих значень концентрації метану $C(t)$, яка перетворюється вимірювальним перетворювачем у сигнал $U(t)$ на його виході (рис. 1). При динамічних вимірюваннях інтерес представляє не вихідний сигнал напруги або струму вимірювального перетворювача $U(t)$, а концентрація метану $C(t)$. Тому задачею обробки результатів є визначення значень концентрації метану $C(t)$ за вихідним сигналом $U(t)$ та оператором W , який описує динамічні властивості вимірювального перетворювача, що є рішенням задачі корекції його апаратної функції. Найпростіше така задача вирішується реалізацією оператора W^{-1} , який є зворотнім оператору W , з використанням корегуючого кола KK (рис. 1) в апаратному або програмному вигляді, який обробляє сигнал $U(t)$. Проте за своєю суттю така задача є некоректною, оскільки зворотний оператор повинен реалізувати функцію прогнозу сигналу, що фізично реалізувати неможливо.



ВП – вимірювальний перетворювач ; КК – коректуюче коло

Рис. 1. Структура інфрачервоного вимірювача метану з динамічною корекцією

У зв'язку з цим коректне вирішення зворотної задачі при вимірюванні динамічних параметрів може бути виконано, якщо передбачити певне запізнювання у формування значень сигналу $C_{КОМ}(t)$ на виході коректуючого кола, що не вимагає реалізації функції прогнозу. Як правило, у найпоширенішому випадку інерційний вимірювальний перетворювач має передавальну функцію, яка відповідає передавальній функції аперіодичного кола першого порядку [3]:

$$W(p) = \frac{U(p)}{C(p)} = \frac{k_{ПП}}{1 + \tau \cdot p}, \quad (1)$$

де $k_{ПП}$, В/°б% – коефіцієнт перетворення вимірювача із значення електричного сигналу, наприклад напруги, у значення концентрації метану; τ , с – постійна часу вимірювального перетворювача з фільтром очищення аналізованої газової суміші від пилу; p – оператор Лапласа.

Диференціальне рівняння, яке описує цей вимірювальний перетворювач, має наступний вигляд:

$$\tau \cdot \frac{dU(t)}{dt} + U(t) = k_{ПП} \cdot C(t). \quad (2)$$

Передавальна функція (1) встановлює залежність між вихідним та вхідним сигналами, які довільно змінюються у часі. Відповідно до перетворення Лапласа:

$$L\{U(t)\} = W(p) \cdot L\{C(t)\}. \quad (3)$$

Співвідношення (3) справедливе і стосовно цифрових систем. Перетворена передавальна функція (1) дозволяє спростити формулу для числових послідовностей, тому має місце наступне перетворення:

$$z\{U(t_k)\} = \tilde{W}(z) \cdot z\{C(t_k)\},$$

де z – перетворення вхідної послідовності, яке визначається співвідношенням

$$z\{C(t_k)\} = C(z) = \sum_{k=0}^{\infty} C(t_k) \cdot z^{-k}. \text{ Вихідна послідовність одержана шляхом}$$

відповідного зворотного перетворення Лапласа:

$$U(z) = k_{ПП} \cdot C(z) - \tau \cdot z^{-1} \cdot U(z).$$

Використовуючи опис кола затримки z^{-1} у дискретній області $U_k = U_{k-1}$ [4], одержана рекурентна формула для розрахунку вихідної послідовності сигналу вимірювача концентрації метану у дискретні моменти часу:

$$U_{k+1} = k_{ПП} \cdot C_{k+1} - \tau \cdot \frac{U_k}{\Delta t}, \quad (4)$$

де Δt , с – шаг дискретизації у часі вихідних електричних сигналів.

Рекурентна формула (4) є аналогом диференціального рівняння безперервної системи (2). За заданими початковими умовами $U(t_0) = 0$ та $C(t_N) = 0$, співвідношення (4) можна використовувати як рекурентну формулу для розрахунку вихідної послідовності вимірювального перетворювача. Передавальна функція коректуючого кола приймає наступний вигляд:

$$W^{-1}(p) = \frac{C_{КОМ}(p)}{U(p)} = \frac{1}{k_{ПП}} \cdot (1 + \tau \cdot p). \quad (5)$$

Таким чином, коректуюче коло повинно реалізовувати функцію диференціювання вихідного сигналу вимірювача концентрації метану $U(t)$ та складання його похідної із самим вихідним сигналом (рис. 2).

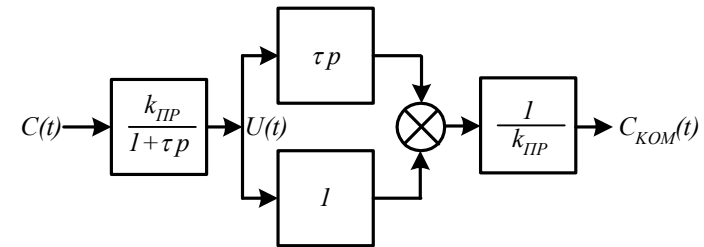


Рис. 2. Структурна схема коректуючого кола вимірювача концентрації метану

Різницеве рівняння коректуючого кола у дискретні моменти часу має наступний вигляд:

$$C_{k+1} = \frac{1}{k_{ПП}} \cdot \left(U_{k+1} + \tau \cdot \frac{U_k}{\Delta t} \right). \quad (6)$$

Для перевірки коректності розробленого способу компенсації динамічної похибки проведено імітаційне моделювання вимірювача концентрації метану із коректуючим колом. На вхід імітаційної моделі подано випадковий стаціонарний сигнал, який має нормальний закон розподілу із наступними параметрами: математичне очікування зміни

концентрації метану $m_c=2,0^{06.0\%}$; середньоквадратичне відхилення $\sigma_c=0,4^{06.0\%}$; кількість точок вибірки $N=50$ (рис. 3). На рис. 3 наведено графіки зміни концентрації метану без компенсації динамічної похибки $C,^{06.0\%} - 1$ та зміни вихідного сигналу вимірювального перетворювача $U_{k+1} \cdot \frac{1}{k_{PP}} ^{06.0\%} - 2$ при

постійній часу фільтру очищення $\tau=0,8$ с, шагу дискретизації за часом $\Delta t=1$ с та коефіцієнту передачі вимірювача концентрації метану $k_{PP}=0,1$ В/ $^{06.0\%}$. Графіки зміни концентрації метану $C,^{06.0\%} - 1$ та зміни концентрації метану $C_{КОМ},^{06.0\%} - 2$ із компенсацією динамічної похибки при використанні програмних методів цифрової обробки результатів вимірювань наведено на рис. 4.

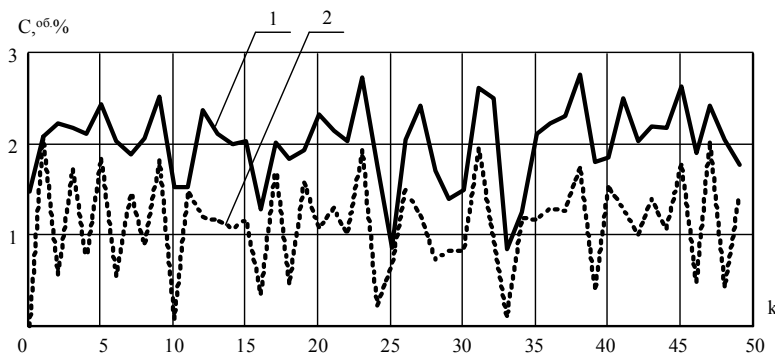


Рис. 3. Сигнали концентрації метану на вході та виході вимірювального перетворювача

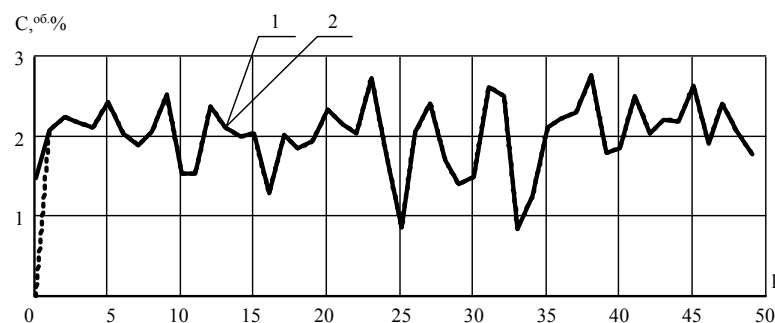


Рис. 4. Сигнали концентрації метану на вході вимірювального перетворювача до та після компенсації динамічної похибки

При використанні розробленого способу компенсації, як видно з рис. 4, практично повністю усувається динамічна похибка інфрачервоного вимірювача концентрації метану з фільтрами очищення аналізованої рудничної атмосфери від пилу.

Реалізація розробленого способу компенсації. Досліджувана газова суміш очищається від пилу шляхом проходження через квазівідкритий фільтр до отримання у вимірювальному каналі аналізованої газової суміші із (3–5) % пилу. Одночасно пропускають потоки інфрачервоного випромінювання від одного або двох джерел через одну або дві вимірювальні кювети. Потоки інфрачервоного випромінювання, які несуть інформацію про зміну концентрації метану у газовій суміші з урахуванням часу запізнювання фільтру очищення, поступають на приймачі, які перетворюють інтенсивність потоків випромінювання в електричні сигнали. Одержані електричні сигнали перетворюють у цифровий код для реалізації програмного методу цифрової обробки результатів вимірювання. Виконується збереження дискретного значення вихідної напруги U_k або відношення, або різниці вихідних напруг вимірювальних каналів у момент часу k , далі у наступний момент часу $k+1$ через інтервал часу Δt процедура вимірювання повторюється. Після чого виконується розрахунок концентрації аналізованого газу у момент часу $k+1$. Описана процедура повторюється циклічно протягом всього часу роботи вимірювача концентрації метану. Дані про концентрацію метану у рудничній атмосфері вугільних шахт з урахуванням корекції динамічної похибки вимірювання виводять на індикатор та за цифровим каналом зв'язку передають до системи аерогазового захисту вугільної шахти або промислового підприємства.

Висновок. Використання компенсації динамічної похибки за допомогою програмних методів цифрової обробки результатів дозволяє виконувати вимірювання концентрації метану у квазіреальному масштабі часу. Запропонований спосіб дозволяє підвищити швидкодію вимірювачів концентрації метану при необхідній точності вимірювання. За рахунок використання фільтрів очищення досягаються необхідні статичні показники точності вимірювання концентрації метану, а для компенсації динамічної похибки використовуються програмні методи цифрової обробки результатів вимірювання. Використання розробленого способу у стаціонарних вимірювачах концентрації метану дозволяє збільшити вірогідність виявлення та контролю вибухонебезпечних концентрацій при раптових викидах метану у вугільних шахтах.

Список літератури: 1. Волошин Н.Е. Внезапные выбросы и способы борьбы с ними в угольных шахтах / Н.Е. Волошин. – К.: Техника, 1985. – 127 с. 2. Пат. 46197. Україна, МПК G 01 N 21 / 31. Спосіб вимірювання концентрації метану у рудничній атмосфері / О.В. Вовна, А.А. Зорі, В.Д. Коренев, М.Г. Хламов; Донец. нац. техн. ун-т (Україна). – № u200906578; заявл. 23.06.2009; опубл. 10.12.2009. 3. Таланчук М.П. Засоби вимірювання в автоматичних інформаційних та керуючих системах: [підручник] / П.М. Таланчук, Ю.О. Скрипник, В.О. Дібровний. – К.: Райдуга, 1994. – 672 с. 4. Титце У. Полупроводниковая схемотехника: в 2 т.: пер. с нем. – Т.2. / У. Титце, К. Шенк. – М.: Додэка – XXI, 2008. – 942 с.